



## Optimasi Moisture Content Proses Dry Kiln Menggunakan Design Of Experiment (DOE) Taguchi

Lies Susilaning SH<sup>1</sup> dan Dwi Suheryanto<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Peneliti pada Balai Besar Kerajinan dan Batik Yogyakarta

Badan Pengkajian Kebijakan Iklim dan Mutu Industri. Kementrian Perindustrian RI

Jl. Kusumanegara 7 Yogyakarta 55166, Telp. (0274) 546111, Fax (0274) 543582

Email : [hastuti2121@gmail.com](mailto:hastuti2121@gmail.com) ; [pringgading04@yahoo.com](mailto:pringgading04@yahoo.com)

### Abstract

*This research present about to predict the optimum of moisture content value in process wood kiln drying. The product quality that wood kiln drying determined by accuracy and moisture content. The aim of forecast moisture content value this optimum will increase quality from wood dehydration result that impact wood endurance. This moisture content value influenced by machinery variable, so that to get optimal result necessary is done variable arrangement dry kiln correct. With Design of Experiment (DOE) taguchi method, can be used to predict the optimal moisture content value so fast and low cost. From the counting is got the optimal moisture content value, that is 17.3334 %, with the optimum level factor for temperature (A2) = 50 °C, The vast object profile (B1) = 415 cm2, the relative of air humidity (C2) = 80 %, time (D3) = 15 days and happen performance enhanced as big as 0.57 % to compare with previous arrangement.*

**Keyword:** air humidity, DOE Taguchi, moisture content, wood dry kiln

### Pendahuluan

Industri pengolahan kayu merupakan barometer peningkatan perekonomian nasional dan factor kunci dalam upaya meningkatkan penerimaan negara dari sector kehutanan. Praktik-praktik eksploratif terhadap sumberdaya hutan telah dilakukan sejak diterbitkannya UU No.5 Tahun 1997, tentang pokok-pokok ketentuan tentang kehutanan. Berbagai fasilitas dan kemudahan diprioritaskan untuk mendorong tercapainya tujuan menjadi industri pengolah kayu sebagai primadota kontributor rill sektor indstri non migas terhadap pembangunan ekonomi nasional (Greenomic Indonesia,2004). Sebagai gambaran kebutuhan produk mebel terbesar dunia adalah European Union (EU), diperkirakanakan memiliki 376 juta konsumen dari 15 anggota EU, dengan total biaya pengeluaran belanja sebesar US\$ 62.489. Pasar furniture potensial dan pembeli terbesar di UE terletak di 5 negara (83%), negara pasar pembeli furniture adalah Jerman (45%), Italia (17%), Perancis (13%), Inggris (12%), Spanyol (7 %), dan Belanda 5% (Dr. Agus H Canny, Ma., M.Sc, Deputi Bidang Pemasaran dan Jaringan Usaha " Menembus Pasa rInternasional Eropa: Furniture).

Isue lingkungan (*Environmental Friendliness*) menjadi faktor utama didalam proses pengambilan keputusan konsumen di negara-negara EU, trend yang berkembang bagi produsen furniture dunia

bahwa penting dan perlunya pelestarian lingkungan, sehingga pemerintah dan LSM negara-negara EU telah kampanye di media agar produsen mebel untuk tetap mengindahkan produksi yang berlandaskan "sustainable woods, natural and environmental Friendly (Agus Madani Canny,2004)

Kayu dalam bentuk log (*glondongan*) yang baru ditebang masih mengandung sejumlah air yang cukup besar jumlahnya, berat airnya bahkan lebih besar dari berat kayu itu sendiri. Air tersebut harus dikeluarkan agar kayu mempunyai stabilitas dimensi yang baik, sehingga mudah dalam penggunaannya. Jumlah total kadar air kayu disebut *moister content* (MC). Vitanen (2002) berpendapat bawa pengeringan merupakan proses penting dalam industri manufaktur kayu. MC kayu merupakan factor penting dasar bagi penggunaan produk-produk kayu dan untuk ketahanan kayu. Saat ini banyak terdapat keluhan konsumen produk kayu, yaitu sering terjadinya perubahan dimensi atau bentuk kayu. Inti dari masalah tersebut adalah kadar air kayu yang tinggi, pengeringan kayu yang selama ini dilakukan di IKM kayu maiz secara tradisional (alami), yaitu memanfaatkan panas matahari, sehingga kadar kekeringan kayu relatif sukar untuk diatur, akibatnya produk yang dihasilkan kurang memenuhi persyaratan yang telah ditentukan untuk memasuki pasar ekspor.

Salah cara untuk mengatasi masalah tersebut, pengeringan dapat dilakukan dengan menggunakan oven (*kiln drying*). Pengeringan dengan oven dapat mengatur pengurangan kadar air didalam kayu, sehingga kayu tidak mengalami *stress*, rusak karena panas yang tinggi secara mendadak. Dan yang paling penting adalah menjaga kelembaban udara didalam oven, panas tinggi dengan kelembaban rendah menyebabkan kayu rusak (Hariyanto Yudodibroto, 1983).

Pada proses pengeringan kayu menggunakan oven, pengaturan parameter (variabel) sebelum proses merupakan hal penting yang perlu dilakukan untuk mencapai hasil *moisture content* yang lebih baik. Lin (1994) berpendapat bahwa pendekatan dengan percobaan dapat dilakukan untuk mencapai kondisi permesinan yang optimal terutama dalam prosesnya. Akan tetapi hal itu akan menghabiskan banyak waktu untuk mengidentifikasi proses pengeringan kayu yang optimum. A. Vairis dan M. Petousis (2009) berpendat, *design of eksperimen* (DOE) telah menjadi suatu metodologi yang penting yang dapat memaksimalkan pengetahuan diperoleh dari data eksperimen dengan menggunakan posisi cerdas titik dalam ruang. Metodologi ini menyediakan alat kuat untuk mendesain dan menganalisis percobaan bahkan menghilangkan pengamatan berlebihan dan mengurangi waktu dan sumber daya untuk melakukan percobaan. Pendekatan ini telah terbukti mampu untuk memilih parameter dari proses manufaktur yang dapat menghasilkan kualitas produk yang lebih baik dengan biaya dan waktu yang minimum (Muhammad Agung Sumarno). Tujuan dari penelitian ini adalah memprediksi nilai *moisture content* yang optimum pada proses pengeringan kayu menggunakan oven (*kiln dryer*) dengan metode DOE Taguchi, mengetahui pengaruh setiap faktor tersebut terhadap *moisture content*, Mengetahui peningkatan performa jika dibandingkan dengan pengaturan sebelumnya.

## Landasan Teori

### Pengeringan Kayu

Pengeringan kayu adalah proses untuk mengeluarkan air yang terdapat di dalam kayu. Kadar air kayu memberikan pengaruh yang sangat besar dalam pemakaian kayu. Untuk berbagai macam dan kegunaan dengan kondisi udara tertentu kayu memerlukan batas kandungan kadar air. Oleh karena itu masalah pengeringan merupakan faktor yang penting pada kayu. Dengan adanya pengeringan kayu, akan diperoleh keuntungan-keuntungan sebagai berikut (Dumanau, 1993):

- Menjamin kesetabilan dimensi kayu. Karena di bawah titik jenuh serat, perubahan kadar air dapat mengakibatkan kembang susut pada kayu.

Sebaliknya jika kayu dikeringkan mendekati kadar air lingkungan, maka sifat kembang susut ini akan dapat teratasi, bahkan dapat diabaikan.

- Menambah kekuatan kayu. Makin rendah kadar air kayu yang di kandung, maka akan semakin kuat kayu tersebut.
- Membuat kayu lebih ringan. Dengan demikian ongkos angkutan berkurang.
- Mencegah serangan jamur dan bubuk kayu. Sebab umumnya jasad renik pengrusak kayu atau jamur tidak dapat hidup di bawah persentase kadar air ± 20%.
- Memudahkan pengerjaan selanjutnya. Antara lain yaitu pengetaman, pengrekan, *finishing*, pengawetan serta proses-proses kelanjutan lainnya.

### Kadar Air Kayu (*Moisture Content*)

Kayu mempunyai sifat absorpsi, yaitu mampu menyerap udara basah, sebaliknya apabila udara kering, uap air akan dilepaskan oleh kayu dan kayu menjadi kering. Banyaknya air yang dikandung oleh sepotong kayu kadar air kayu (MC). Jumlah MC kayu tergantung kepada kelembaban udara disekelilingnya. MC pada kayu sangat bervariasi sekali. Rata-rata kayu berkandungan air 6% - 300%, dinyatakan dalam persentase dari kayu kering tanur.

$$MC = \frac{(\text{Berat kayu} + \text{air}) - (\text{Berat kayu kering tanur})}{\text{Berat kayu kering tanur}} \times 100\%$$

### Faktor – Faktor Yang Mempengaruhi *Moisture Content*

- Suhu (*Temperature*)
- Kelembaban Relatif
- Luas Penampang Objek
- Waktu

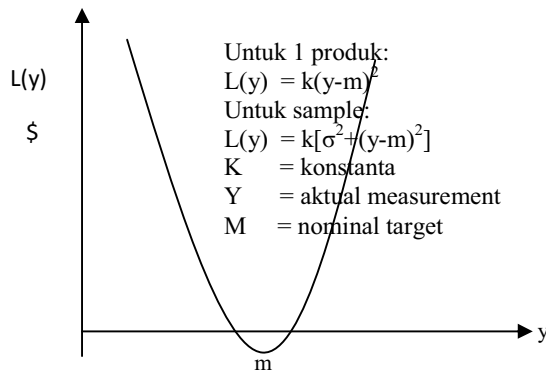
### Design of Experiments (DOE) Taguchi

Metode Taguchi adalah metode yang menggabungkan metode statistik dan keteknikan yang dikembangkan oleh Genichi Taguchi untuk meningkatkan kualitas dari produk dan proses manufaktur.

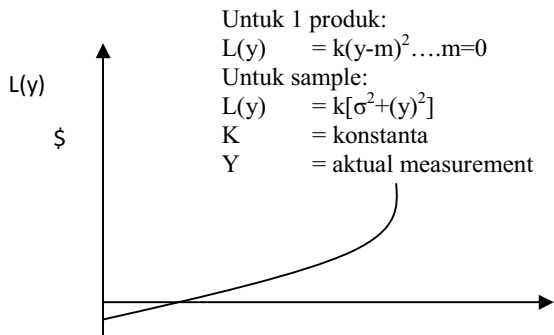
### Kontribusi Terhadap Kualitas

#### The Loss Function

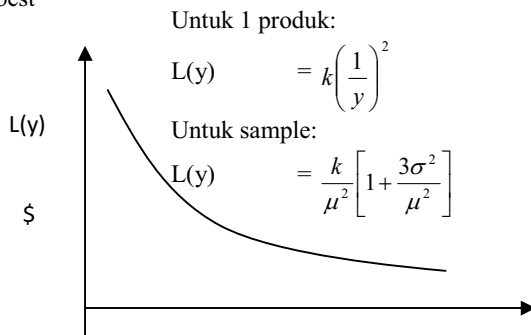
Konsep Loss Function didasarkan pada total simpangan dari karakteristik kualitas yang ditargetkan. Pada simpangan nol, maka produk tepat sekali seperti apa yang ditargetkan, dan kerugian sama dengan nol. Tujuan dan fungsi kerugian Taguchi adalah untuk mengevaluasi kerugian kualitas secara kuantitatif yang disebabkan adanya variasi.



Gambar 1. Grafik fungsi quadratic loss nominal the best



Gambar 2. Grafik fungsi quadratic loss smaller the best



Gambar 3. Grafik fungsi quadratic loss larger the best

### Orthogonal Array dan Linear Graph

Manfaat utama dari orthogonal array adalah untuk menghubungkan faktor yang digunakan dalam investigasi. Untuk setiap level dalam satu faktor, semua level dari faktor lain terjadi dalam jumlah yang sama. Manfaat lain dari orthogonal array adalah mengefisienkan biaya. Walaupun diseimbangkan, desain dari orthogonal array tidak membutuhkan semua kombinasi dari faktor yang dites. Sehingga matrix eksperimen dapat lebih kecil tanpa kehilangan informasi yang vital. Hasilnya eksperimen dapat dilakukan dengan biaya yang efektif.

Tabel 1. Orthogonal Array standar (Belavendram, 1995)

2 level	3 level	4 level	5 level	Level gabungan
$L_4(2^3)$	$L_9(3^4)$	$L_{16}(4^3)$	$L_{25}(5^6)$	$L_{18}(2^1 \times 3^7)$
$L_8(2^7)$	$L_{27}(3^{13})$	$L_{64}(4^{21})$		$L_{32}(2^1 \times 4^9)$
$L_{12}(2^{11})$	$L_{81}(2^{40})$			$L_{36}(2^{11} \times 3^{12})$
$L_{16}(2^{15})$				$L_{36}(2^3 \times 3^{13})$
$L_{32}(2^{31})$				$L_{54}(2^1 \times 3^{25})$
$L_{64}(2^{63})$				$L_{50}(2^1 \times 5^{11})$

### Robustness

Klasifikasi karakteristik kualitas menurut nilai targetnya:

- Larger the Better (QC=B)

Tujuan dari karakteristik Larger the Better adalah untuk mencapai nilai yang sebesar/settinggi mungkin.

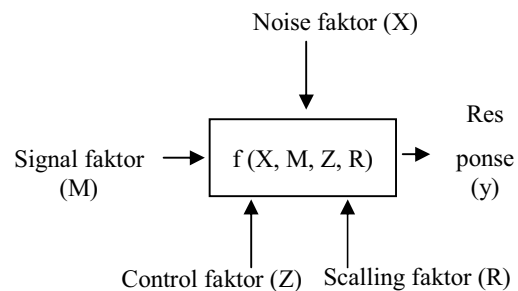
- Smaller the Better (QC=S)

Tujuan dari karakteristik Smaller the Better adalah untuk mencapai nilai yang serendah/sekecil mungkin yaitu 0.

- Nominal the Best (QC=N)

Tujuan dari karakteristik Nominal the Better adalah untuk mencapai nilai yang telah ditentukan atau dengan nilai yang spesifik.

Klasifikasi parameter



Gambar 4. Faktor yang mempengaruhi karakteristik kualitas

### Metodologi

Penelitian dilakukan di CV. Bina Karya Utama yang berlokasi Mertosanan Wetan, Potorono Kecamatan Banguntapan Kabupaten Bantul Yogyakarta yang bergerak di bidang industri furniture. Penelitian ini difokuskan pada optimasi moisture content pada proses dry kiln. Adapun model yang dikembangkan adalah sebagai berikut:

#### Larger the Better (QC=B)

$$S / N(\eta) = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{y_j^2} \right) \quad (1)$$

#### Smaller the Better (QC=S)

$$S / N(\eta) = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j^2 \right) \quad (2)$$

#### Nominal the Best (QC=N)

$$S / N(\eta) = -10 \log \sum \left( \frac{(y_i - \bar{y}^2)}{n-1} \right) \quad (3)$$

### Hasil dan Pembahasan

#### Analisa Penentuan Faktor Terkontrol, Noise Faktor dan Level

Nilai temperatur yang dipilih adalah 40, 50 dan 60 °C karena untuk mendapat hasil MC yang baik temperature berkisar 40 °C – 60 °C, karena bila kondisi disekitar kayu terlalu jauh berbeda dengan kondisi dalam kayu, akan timbul ketegangan dalam kayu (*drying stresses*). Ukuran luas penampang yang dipilih yaitu 415, 235 dan 190 cm<sup>2</sup>. Karena ukuran kayu limbah yang di peroleh dari limbah industry lain maupun sisa dari pemotongan kayu log yaitu 5 cm – 10 cm untuk lebar dan dengan ketebalan 1 cm – 3 cm. Terkait dengan peningkatannya produksi kayu olahan. Nilai kelembaban udara relatif yang dipilih yaitu 70, 80 dan 90 %/m<sup>3</sup>. Untuk mendapatkan nilai *moisture content* ≤ 20% maka nilai kelembaban udara relatif harus ≤ 90 %/m<sup>3</sup>. Tetapi sama seperti temperatur, kelembaban udara relative yang dikenakan tidak boleh terlalu rendah karena dapat menyebabkan *drying stresses*. Untuk proses pengeringan dilakukan dalam 3 *chamber kiln dryer* dan dengan 3 pengelompokan periode yaitu 5, 10 dan 15 hari. Ukuran periode ini di sesuaikan dengan jadwal pengeringan kayu yang ada yaitu 10 – 20 hari. Tool diameter dimasukan dalam penelitian ini karena juga untuk mengetahui pengaruh tool diameter terhadap hasil surface roughness. Tool diameter yang dipilih adalah 3, 5 dan 10. Tool ini dari jenis dan bahan yang sama.

#### Analisa Orthogonal Array

Dalam penelitian ini digunakan empat faktor dengan tiga level tanpa adanya interaksi antar faktor. Dari penghitungan kesesuaian orthogonal array didapat bahwa orthogonal array yang sesuai adalah L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>). Orthogonal array L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>) terdiri dari empat kolom yang masing – masing kolom terdiri dari tiga level, sehingga setiap kolom dari orthogonal array tersebut digunakan sebagai kombinasi eksperimen.

Dari penghitungan nilai efisiensi eksperimen penelitian ini didapat nilai sebesar 100%, artinya pemakaian orthogonal array ini sangat efisien diterapkan dalam eksperimen ini.

#### Analisa Nilai MC

Untuk menentukan nilai MC digunakan Lignomat *Wood Moisture meter*. Dilakukan dengan 3 kali pengukuran agar didapat nilai yang lebih akurat.

#### Analisa dari ANOVA

Uji ANOVA digunakan untuk mengetahui pengaruh dari masing – masing faktor terhadap data. Dengan uji ini juga dapat diketahui seberapa besar error dalam pengambilan data. Derajat bebas denominator didapat dari banyak level – 1, yaitu 3 – 1 = 2. Untuk derajat bebas numerator didapat dari 27 – 1 – 8 = 18. Dengan tingkat signifikansi 0.05 maka diperoleh F<sub>table</sub> sebesar 3.55.

- Analisa nilai F ratio dari setiap faktor adalah sebagai berikut:

F ratio temperatur adalah 15.13 > 3.55, artinya temperatur mempengaruhi secara signifikan terhadap raw data. F luas penampang objek adalah 8 > 3.55 artinya luas penampang objek mempengaruhi secara signifikan terhadap raw data. F ratio kelembaban udara relatif adalah 6.5 > 3.55 artinya kelembaban udara relatif mempengaruhi secara signifikan terhadap raw data. F waktu diameter adalah 58.63 > 3.55 artinya waktu mempengaruhi secara signifikan terhadap raw data.

- Analisa kontribusi setiap faktor terhadap raw data

Berdasarkan nilai F ratio, faktor luas penampang objek faktor kelembaban udara relatif mempengaruhi secara signifikan raw data tetapi memberi kontribusi yang sangat kecil yaitu sebesar 7.2 % dan 5.66. Hal ini dimungkinkan kondisi tool yang digunakan dalam kondisi yang tidak sama. Error memberikan kontribusi sebesar 13.37 % dan melebihi faktor luas penampang objek faktor kelembaban udara relatif sehingga pengambilan data bias. Hal ini mungkin dikarenakan oleh setting parameter untuk faktor luas penampang objek faktor kelembaban udara relative tidak dapat mewakili identitas dari masing-masing faktor tersebut.

#### Analisa Average Effect Response Mean dan S/N Ratio

Average effect response mean digunakan untuk mengetahui performa dari masing – masing faktor dan level. Performa terbaik adalah faktor level yang mempunyai nilai average effect response mean terkecil. Nilai delta dari masing – masing faktor dapat juga digunakan untuk mengetahui urutan kontribusi masing – masing faktor terhadap raw data. Dari nilai delta tersebut diperoleh urutan faktor

dari yang terbesar adalah: waktu, temperatur, luas penampang objek dan kelembaban udara relatif. Hasil ini sama dengan hasil dari uji ANOVA. Untuk mempermudah dalam analisa maka digunakan plot data:

- Untuk temperatur optimal didapat pada level dua. Performa paling rendah didapat pada level satu.
- Untuk luas penampang objek, level optimal didapat pada level 1. Apabila level dinaikkan maka performa semakin rendah.
- Untuk kelembaban udara relatif optimal didapat pada level dua. Performa paling rendah didapat pada level tiga.
- Untuk waktu optimal didapat pada level 3. Apabila level diturunkan maka performa semakin rendah. Performa terendah pada level 1.

Dalam plot data digambarkan dengan adanya tanda panah keatas, berarti jika nilai mean semakin kecil maka performa justru semakin baik.

Average Effect S/N Ratio digunakan untuk mengetahui variasi dari masing – masing faktor dan level. Variasi terkecil adalah faktor level yang mempunyai nilai Average Effect S/N Ratio terbesar. Nilai delta juga digunakan untuk mengetahui urutan kontribusi faktor terhadap raw data. Dari nilai delta tersebut diperoleh urutan faktor dari yang terbesar adalah: feed rate, depth cut, spindle speed dan tool diameter. Hasil ini sama dengan hasil dari analisa average effect response mean dan uji ANOVA.

- Untuk temperatur, nilai S/N terbaik diperoleh pada level 2. Level 1 menghasilkan variasi yang paling besar. Dari level 2 ke 3 maka menghasilkan variasi yang lebih kecil.
- Untuk luas penampang objek, nilai S/N terbaik diperoleh pada level 1. Apabila level dinaikkan maka variasi semakin besar.
- Untuk kelembaban udara relatif, nilai S/N terbaik diperoleh pada level 2. Level 1 menghasilkan variasi yang paling besar. Dari level 2 ke 3 maka menghasilkan variasi yang lebih kecil.
- Untuk waktu, nilai S/N terbaik diperoleh pada level 3. Apabila level diturunkan maka variasi semakin besar.

Dalam plot data digambarkan dengan adanya tanda panah kebawah, berarti jika nilai mean semakin besar maka variasi justru semakin baik. Sehingga faktor level yang optimum didapat pada Temperatur (A2) = 50 °C, Luas Penampang Objek (B1) = 415 cm<sup>2</sup>, Kelembaban Udara Relatif (C2) = 80 %, Waktu (D3) = 15 hari.

Dari penghitungan nilai predicting mean diperoleh sebesar 17.3334, dan predicted S/N ratio -24.7906. Jika dibanding dengan nilai mean eksperimen, nilai predicting mean lebih kecil artinya nilai prediksi mempunyai performa yang lebih baik. Dan nilai predicted S/N ratio lebih besar daripada nilai S/N ratio eksperimen artinya variasinya lebih baik.

## Analisa Konfirm Eksperimen

Eksperimen konfirmasi dilakukan sebanyak 5 kali. Hasil yang diperoleh adalah 18, 17, 17, 20 dan 17. Dengan mean 17.8. Untuk mengetahui, hasil dari *predicting mean reproducible* yaitu dengan membandingkan nilai Confidence interval-predicting mean dengan Confidence interval-konfirmasi mean. Jika confidence interval-predicting mean lebih besar dari confidence interval-konfirmasi mean maka *predicting mean reproducible*. Dari penghitungan diperoleh sebagai berikut:

$$\text{Confidence interval-predicting mean} \\ 16.169 \leq \mu_{\text{predicted}} \leq 18.4978$$

$$\text{Confidence interval-konfirmasi mean} \\ 16.3555 \leq \mu_{\text{predicted}} \leq 19.2445$$

Nilai bawah confidence interval-predicting mean lebih kecil dari confidence interval-konfirmasi mean, yaitu  $16.169 < 16.3555$ . Nilai atas confidence interval-predicting mean lebih kecil dari confidence interval-konfirmasi mean, yaitu  $18.4978 > 19.2445$ . Sehingga tidak reproducible.

## Analisa Loss per Piece

$$\text{Diperoleh hasil } \phi = kMSD_{\text{existing}} \times 0.57.$$

Artinya adanya peningkatan performa atau penurunan loss sebesar 0.57 % dibandingkan dengan sebelumnya.

## Kesimpulan dan Saran

### Kesimpulan

- Dengan menggunakan pendekatan DOE Taguchi didapat nilai *moisture content* yang optimal adalah sebesar 17.3334 %. level yang optimum didapat pada Temperatur (A2) = 50 °C, Luas Penampang Objek (B1) = 415 cm<sup>2</sup>, Kelembaban Udara Relatif (C2) = 80 %, Waktu (D3) = 15 hari.
- Dari uji ANOVA diperoleh kontribusi setiap faktor terhadap hasil *surface roughness*, yaitu: faktor waktu = 59.25 %, faktor temperature = 14.52 %, faktor luas penampang objek = 7.20 %, dan faktor kelembaban udara relatif = 5.66 %.
- Diperoleh peningkatan performa atau penurunan loss sebesar 0.57 % dibanding dengan pengaturan sebelumnya.

### Saran

Untuk pengembangan penelitian selanjutnya alternatif lain yang bisa digunakan adalah dengan membandingkan dengan menggunakan pendekatan Six Sigma atau desain of eksperimen lainnya dan memasukan faktor dan response lain yang lebih kompleks.

## Daftar Pustaka

- Agus Hamdani Canny, 2004, Menembus pasar Internasional Eropa : furniture, *Makalah pada pameran dan temu bisnis, Forum Komersialisasi Hasil Riset Teknologi Industri*, Jakarta.
- Belavendram, N., 1995, *Quality By Design -Taguchi Techniques for Industrial Experimentation*, Prentice-Hall International, Maylands Avenue, UK.
- Dumanauw, J. F., 1993, *Mengenal Kayu*, Penerbit Kanisius, Semarang.
- Dodong Budianto, A., 2002, *Sistem Pengeringan Kayu*, Penerbit Kanisius, Semarang.
- Greenomic Indonesia, 2004, Industri Pengolahan Kayu Evaluasi Terahap Mekanisme Perizinan, Kewenangan dan Pembinaan Industri Pengolahan Kayu, *Indonesian Corruption Watch*, Jakarta.
- Hariyanto Yudodibroto, 1983, *Pengeringan Kayu*, Fakultas Kehutanan, Uversitas Gajah Mada, Yogyakarta, 1983
- Lin, S.C., 1994, *Computer Numerical Control-From Programming To Networking*, Albany, New York, Delmar.
- Muhammad Agung Sumarno., 2007, *Optimasi Surface Roughness pada Operasi End Milling*, Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Yogyakarta.
- Peach, Glen Stuard , 1993, *Taguchi Methods: A hands-On Approach*, Adison Wesley Publishing Company, Massachusetts 01867.
- Viltanen, H., 2002, *Factor Affecting Mould Growth on Kiln Dried Wood*, VTT Building and Transport, Finland.
- Vairis, A., Petousis, M., 2009, *Designing experiments to study welding processes: using the Taguchi method*, Mechanical Engineering Dept. TEI of Crete, Heraklion 71004, Greece.